

Modelo de otimização do espaço livre de armazenagem num Silo de Cereais

Mónica Glória Cardoso



Mestrado em Engenharia Mecânica

Especialização em Gestão Industrial

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2012

Candidato: Mónica Glória Cardoso, Nº 1990435 1990435@isep.ipp.pt

Orientação científica: Eduarda Pinto Ferreira epf@isep.ipp.pt

Co-orientação científica: Marisa Oliveira mjo@isep.ipp.pt

Supervisor na empresa: Cardia Lopes jorgecardia@sapo.pt

*Quero dedicar esta dissertação ao meu namorado que acreditou em mim e não me
deixou desistir*

Agradecimentos

Quero agradecer às professoras Eduarda Pinto Ferreira e Marisa Oliveira pela orientação e todo o apoio prestado ao longo deste trabalho.

Ao meu colega Eng.^o Cardia Lopes por me ter dado a hipótese de desenvolver um trabalho nesta área. Por ter partilhado comigo toda a sua experiência e sabedoria, sobre as questões técnicas de armazenagem de cereais em silos, adquiridas ao longo de uma vida. Pela oportunidade de visitar uma empresa real de armazenagem de cereais.

Ao meu colega do GECAD, Bruno Canizes que me ajudou a recuperar a minha biblioteca de referências quando o meu computador deixou de funcionar.

Resumo

Este trabalho baseia-se num caso de estudo real de planeamento de operações de armazenagem num silo rural de cereais, e enquadra-se nos problemas de planeamento e programação de armazéns.

Os programadores deparam-se diariamente com o problema de arranjar a melhor solução de transferência entre células de armazenagem, tentando maximizar o número de células vazias, por forma a ter maior capacidade para receber novos lotes, respeitando as restrições de receção e expedição, e as restrições de capacidade das linhas de transporte.

Foi desenvolvido um modelo matemático de programação linear inteira mista e uma aplicação em Excel, com recurso ao VBA, para a sua implementação. Esta implementação abrangeu todo o processo relativo à atividade em causa, isto é, vai desde a recolha de dados, seu tratamento e análise, até à solução final de distribuição dos vários produtos pelas várias células.

Os resultados obtidos mostram que o modelo otimiza o número de células vazias, tendo em conta os produtos que estão armazenados mais os que estão para ser rececionados e expedidos, em tempo computacional inferior a 60 segundos, constituindo, assim, uma importante mais valia para a empresa em causa.

Palavras-chave: *Cereals silos planning, Mixed Integer Programming, Storage optimization, Warehouse storage scheduling*

Abstract

This work is based on a real case study for planning storage operations in a rural grain silo, and fits the problems of planning and programming of warehouses.

Programmers are faced daily with the problem of finding the best solution for transfers between storage cells, trying to maximize the number of empty cells in order to have greater capacity to receive new lots, subject to receiving, dispatching, and transportation lines capacity constraints.

We developed a mixed integer linear programming model and an Excel/VBA application for its implementation. This implementation included the entire process, ranging from data collection, its treatment and analysis to the final solution for the distribution of various products by various cells.

The results show that the model optimizes the number of empty cells, in computation time less than 60 seconds, and thereby constitutes a significant added value to the company concerned.

Keywords: Cereals silos planning, Mixed Integer Programming, Storage optimization, Warehouse storage scheduling

Résumé

Ce travail est basé sur une étude de cas réel pour la planification des opérations de stockage dans un silo à grains rural, et s'adapte à des problèmes de planification et de programmation des entrepôts.

Les programmeurs confrontés la difficulté de trouver la meilleure solution pour les transferts entre les cellules de stockage, en essayant de maximiser le nombre de cellules vides dans le but d'avoir une plus grande capacité de recevoir de nouveaux lots, sous réserve des restrictions de réception, d'expédition et capacité des lignes de transport.

Nous avons développé un modèle de programmation linéaire mixte entier et une application dans Excel/VBA. La mise en œuvre comprenait l'ensemble du processus relatif à l'activité en question, du traitement et l'analyse de la solution finale pour la distribution de divers produits par les différentes cellules.

Les résultats montrent que le modèle optimise le nombre de cellules vides, en tenant compte des produits qui sont stockés sur ceux qui doivent être reçus et envoyés dans les temps de calcul moins de 60 secondes, et constitue donc une valeur ajoutée significative à la société concernée.

Les mots clés: Cereals silos planning, Mixed Integer Programming, Storage optimization, Warehouse storage scheduling

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Organização	3
2	Estado da arte	5
2.1	Abordagens para a resolução de problemas de armazenagem	10
2.1.1	Mixed integer programming.....	11
2.1.2	Algoritmos genéticos.....	13
2.1.3	Simulated annealing e pesquisa tabu.....	15
3	Descrição do Problema	19
3.1	Descrição do Processo.....	28
3.2	Formulação do Problema	35
	Variáveis de decisão:	38
3.3	Implementação da solução	40
4	Resultados e Análise	47
5	Conclusões.....	52
	Referências Bibliográficas	54

Índice de Figuras

Figura 1: Projeto do armazém e problemas de operação [1]	8
Figura 2: Navio atracado no porto a descarregar cereais	20
Figura 3: Circulação de camiões junto aos silos	21
Figura 4: Tegão de receção ferroviário	22
Figura 5: Tegão de receção rodoviário	22
Figura 6: Elevador de alcatruzes	23
Figura 7: <i>Redler</i> de distribuição R1	24
Figura 8: Interior de uma célula	25
Figura 9: Sala de controlo do processo	26
Figura 10: Controlo efetuado através de <i>software</i>	26
Figura 11: Túneis de entrada dos camiões	27
Figura 12: Visão geral dos silos	28
Figura 13: Vista pelo exterior das células verticais	29
Figura 14: Cabeça dos elevadores no 14 ^o Piso	31
Figura 15: Galeria superior do silo de armazenagem	32
Figura 16: Parte superior do distribuidor	33
Figura 17: Esquema das células de expedição	39
Figura 18: Folha de dados	41
Figura 19: Existência nas células	41
Figura 20: Coluna das receções previstas	42
Figura 21: Necessidades nas células de expedição	43
Figura 22: Valores referentes a armazenagem	43
Figura 23: Modelo (MIP)	44
Figura 24: Botão para preencher a matriz do modelo	44
Figura 25: Dados dos produtos armazenados pelas várias células	47
Figura 26: Produtos a rececionar e a expedir	48
Figura 27: Situação inicial (estado inicial das células)	50
Figura 28: Solução final (estado final das células)	51

Índice de Tabelas

Tabela 1: Identificação e localização das paletes [5]	7
Tabela 2: Problemas do projeto e das operações do armazém [1]	9

Acrónimos

MIP – Mixed integer programming

SA – Simulated annealing

AG – Algoritmos genéticos

PT – Pesquisa tabu

RHS – Right hand side

JIT – Just in time

SKU – Stock keeping units

VBA – Visual basic for applications

1 Introdução

Esta dissertação foi realizada no âmbito da disciplina Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Mecânica especialização em Gestão Industrial.

Neste capítulo a proposta apresentada vai ser contextualizada, bem como a definição dos principais objetivos. Ao longo deste relatório evidencia-se um conjunto de informação que foi pesquisada sobre a área de estudo em questão.

O presente trabalho foca-se nas necessidades de uma empresa de armazenamento de cereais organizar atempadamente a movimentação dos cereais entre células (localizadas no interior dos silos). Com uma ferramenta eficiente que torne o processo de programação de armazenagem o mais automático possível, a empresa torna-se mais dinâmica e competitiva.

Como se trata de um problema real é de salientar as inúmeras dificuldades que surgem, tais como: as visitas à empresa e a recolha de dados em tempo útil para avançar nas várias etapas da resolução do problema.

1.1 Contextualização

O presente trabalho trata-se de um caso de estudo que tem como objetivo ser aplicado a sistemas de armazenagem de cereais em silos. Na armazenagem de cereais os

controladores deparam-se diariamente com inúmeras dificuldades, por isso é importante ter um bom planeamento e programação de todo o processo que começa com a receção, passando de seguida pela armazenagem e que é finalizado pela expedição dos cereais.

Atualmente, é cada vez mais importante recorrer a métodos de otimização para a receção, a armazenagem e a expedição dos produtos num determinado armazém.

Num armazém, sempre que as capacidades de armazenagem diminuem, deve-se imediatamente comprimir as áreas ocupadas, por forma a obter o maior número de espaços vazios para as novas necessidades de armazenamento. Com a medida de comprimir os espaços utilizados pelos diferentes produtos, também consegue-se reduzir os tempos de transporte, ou seja, como os produtos estão mais próximos uns dos outros o tempo usado para recolher os vários produtos para expedir ou reorganizar no armazém é menor.

Quando se implementa um método de otimização num armazém, é necessário ter em conta vários fatores, tais como: os tipos de produtos que vão ser armazenados, as formas dos diferentes produtos, as suas dimensões, o peso, as características específicas e qual a rotatividade (se se trata de um produto que é expedido com frequência) de cada um deles.

Para obter uma otimização do armazém tem que se desenvolver um *layout* que permita manusear com facilidade os produtos e maximizar o espaço existente.

Por vezes consegue-se reduzir o armazenamento fazendo um *cross-docking*, ou seja, o produto é rececionado e vai direto para a expedição.

1.2 Objetivo

Tendo em conta o problema em questão, o objetivo é criar um modelo matemático que possa ser implementado numa aplicação informática.

Pretendemos com este modelo, otimizar o espaço livre disponível para a receção de novos lotes, isto é, maximizar o número de células vazias nos silos de cereais,

respeitando as restrições de capacidade das células e das linhas de transporte, e satisfazendo as necessidades de receção e expedição.

1.3 Organização

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

Neste capítulo faz-se a contextualização do problema, bem como a descrição dos objetivos e metas a atingir.

No segundo capítulo é descrito o estado da arte, são descritas as abordagens teóricas idênticas ao problema do caso de estudo.

No terceiro capítulo faz-se a descrição do processo e do problema. É apresentado um modelo matemático, criado com base em programação linear inteira mista (MIP).

No quarto capítulo descreve-se a implementação da aplicação desenvolvida e como esta pode ser utilizada na prática. Neste mesmo capítulo são descritas as características do exemplo fornecido pela empresa para testar o funcionamento da aplicação.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos e é feita a análise dos mesmos.

No sexto capítulo são descritas as conclusões do trabalho.

2 Estado da arte

Na pesquisa efetuada, não encontramos literatura específica sobre armazenagem e otimização da capacidade de silos de cereais. Na pesquisa realizada sobre a temática “Armazenagem de cereais em silos” a maioria dos artigos referem-se a questões relacionadas com aspetos de conservação e de alterações microbiológicas dos produtos armazenados. O estado da arte incide sobre problemas que utilizam ferramentas e abordagens idênticas às que vão ser usadas no caso de estudo, e que se enquadram no problema mais geral de otimização de armazéns.

Um sistema de armazenamento tem como finalidade armazenar materiais até estes serem expedidos para os clientes. Existe uma variedade enorme de produtos que são armazenados que vão desde telemóveis, produtos farmacêuticos, cereais em silos verticais, etc.

Para as empresas tornarem os seus produtos mais competitivos existem vários fatores que devem ser melhorados continuamente tais como a conceção, a produção e a distribuição. Para estes fatores terem sucesso é indispensável que a gestão dos armazéns tenham um maior desempenho.

Novas filosofias de gestão estão a ser adotadas que é o caso da produção *Just in Time* (JIT) ou produção *Lean* o que traz novos desafios para os sistemas de armazenagem, o que vai implicar um maior controlo de inventário, tempos de resposta mais curtos e uma maior variedade de gamas de produtos. Por outro lado, a implementação generalizada de novas informações tecnológicas, tais como códigos de barras e sistemas de gestão de armazenamento, possibilitando assim uma melhoria nas operações do armazém,

permitindo uma fácil comunicação com toda a cadeia de abastecimento e conseguindo uma maior automação de todo o processo [1].

Os sistemas de armazenamento são considerados como uma componente essencial de todas as cadeias de abastecimentos. Embora a maioria dos sistemas de armazenamento sejam estacionários, alguns são móveis, tais como o veículo de um técnico de manutenção que transporta um *stock* de peças de substituição/reparação.

Independentemente do tipo de material existente num armazém, existem processos importantes a ter em conta: a receção dos materiais, armazenamento, *picking* e expedição. [2]

Considera-se que todos os sistemas de armazenagem possuem uma determinada estrutura e comportamento. A diferença entre estrutura e comportamento é que a estrutura relaciona-se com a forma física do sistema de armazenamento e o comportamento com a gestão do sistema de armazenamento. O desempenho depende de vários fatores importantes, tais como o projeto para criar o *layout* do armazém, as políticas de gestão e a eficiência com que se executam funções básicas. [2, 3]

Num armazém é necessário considerar o fluxo do material. As mercadorias rececionadas em regra são entregues por camiões no cais de receção, local onde são verificadas as guias de transporte relativamente às quantidades de cada produto e aleatoriamente a qualidade dos mesmos. Relativamente à expedição, as cargas são preparadas na área de armazenagem (podem ter que ser embaladas de uma forma específica, ou apenas rotuladas) para serem carregadas a posteriori. Se os materiais estiverem armazenados em módulos (por exemplo, paletes, lotes ou caixas). As cargas devem ser reagrupadas para um local dentro do armazém para serem expedidas [4].

Oliveira [5] apresentou uma aplicação através de uma metaheurística para aplicar a um problema real de expedição de cargas, armazenadas num armazém automático. Trata-se de um algoritmo eficaz e eficiente para maximizar o rendimento do armazém e cumprir os prazos de entrega. Para tal é necessário programar todos os movimentos das paletes que vão ser expedidas. É necessário identificar que produtos fazem parte da carga C_i (carga para expedir) e em que paleta P_j eles estão armazenados. É necessário fazer uma programação do *picking* de acordo com a carga, a identificação e a localização das paletes (Tabela 1).

Tabela 1: Identificação e localização das paletes [5]

C_i	P_j				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
1	1	1	3	1	2
2	2	2	2	1	2
3	3	3	3	1	3
4	4	1	3	4	3
5	2	4	4	4	3

Consegue-se obter sucesso nas operações de armazenagem se forem satisfeitos alguns requisitos básicos tais como receber material denominado por *Stock Keeping Units* (SKU) por parte dos fornecedores, armazená-los de forma conveniente para os utilizar quando necessário e prepará-los para expedir para os clientes. Contudo é necessário ter bons recursos, (espaço físico, equipamentos de trabalho, alocados em diferentes seções do armazém). Na Figura 1 está representado um esquema para classificar a programação do planeamento de um armazém apresentado por Jinxiang *et al* [1].

Jinxiang *et al* [1] apresentam uma descrição mais detalhada de cada categoria de problemas de projeto e operações inerentes a um armazém, é indispensável fazer uma boa programação de todas operações que se efetuam desde a receção até a expedição dos produtos. Na Tabela 2 são identificados os problemas que surgem num armazém e quais as decisões a ser tomadas nas diferentes situações.

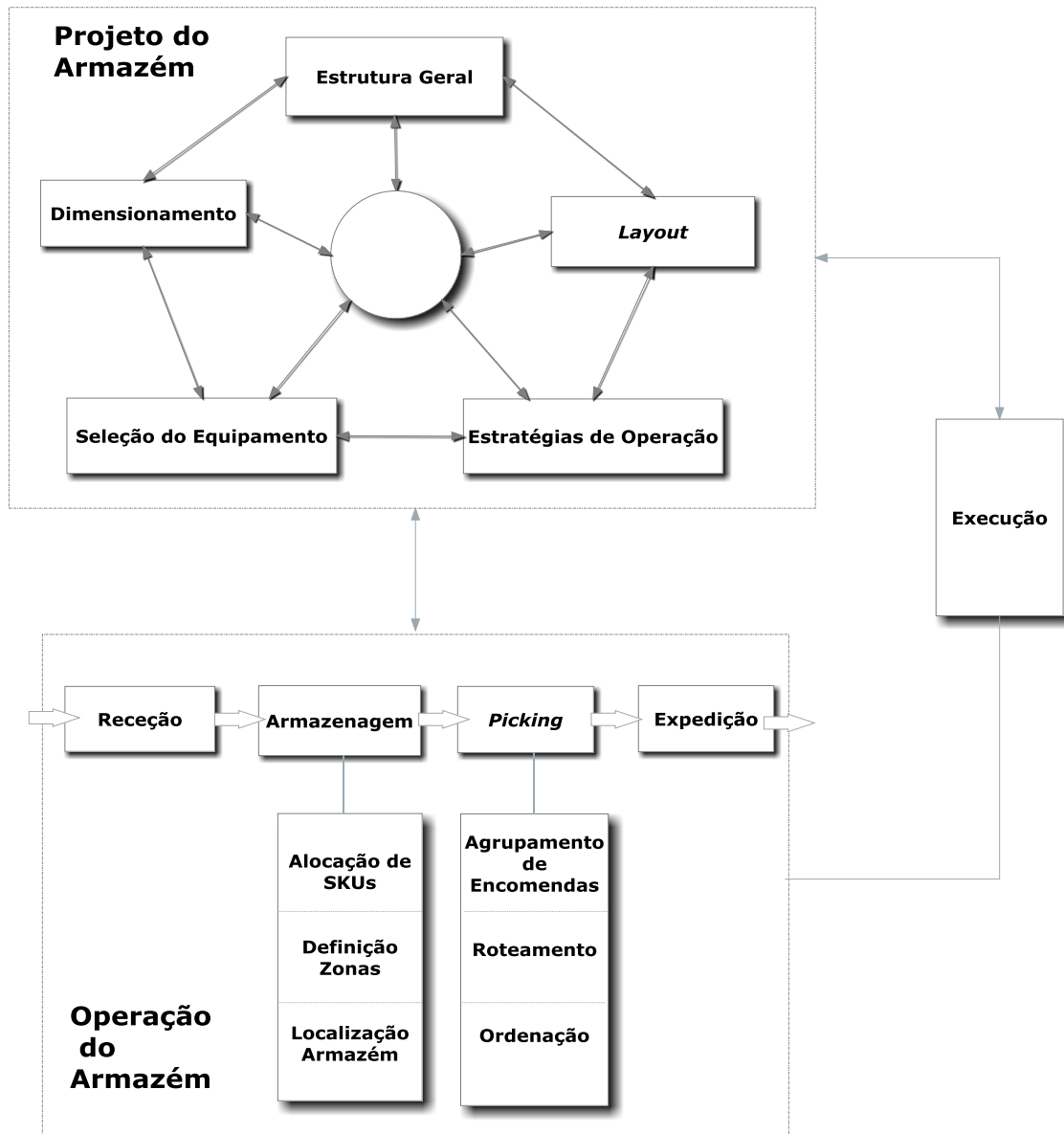


Figura 1: Projeto do armazém e problemas de operação [1]

Tabela 2: Problemas do projeto e das operações do armazém [1]

Problemas de Projeto e Operações		Decisões
Projeto do armazém	Estrutura Geral	<ul style="list-style-type: none"> Fluxo de material Identificação e localização dos departamentos
	Tamanho e dimensionamento	<ul style="list-style-type: none"> Tamanho do armazém e dos departamentos
	<i>Layout</i>	<ul style="list-style-type: none"> Paletes empilhadas de forma <i>standard</i> Orientação, comprimento, Largura e número dos corredores Localização das Portas
	Seleção de equipamento	<ul style="list-style-type: none"> Nível de automação Seleção dos equipamentos de armazenagem, manuseamento e distribuição
	Estratégias de operação	<ul style="list-style-type: none"> Estratégias de armazenagem Método para o <i>picking</i> das encomendas
Operações do armazém	Receção e expedição	<ul style="list-style-type: none"> Atribuição do cais de embarque Programação das receções Agendamento dos camiões
	Armazenamento	<ul style="list-style-type: none"> Atribuição de referências Distribuição de SKUs e <i>pickers</i> pelas várias zonas de armazenagem Diferenciação das várias classes de armazenagem
	<i>Picking</i> das encomendas	<ul style="list-style-type: none"> Tamanho do lote Definição do lote com encomendas Roteamento e sequência do <i>picking</i> Ponto de partida Atribuição do percurso

O desempenho de um sistema de armazenamento depende de quatro características internas e suas inter-relações: (1) capacidade de armazenagem ou a densidade de armazenagem; (2) materiais armazenados em locais de fácil acesso; (3) complexidade da estrutura interna; e (4) características externas, como o número de produtos, o tipo de produtos, *stock* total a ser armazenado, o tipo e o equilíbrio da entrada e os fluxos de saída. [2, 3]

É normal projetar-se armazéns em que o seu interior está dividido em vários compartimentos de armazenagem. Os produtos têm que ser armazenados de forma compatível com as suas características físicas tais como temperatura, peso e perigosidade.

Goetschalckx [3] enuncia, como exemplo, de existir num supermercado produtos com três classes distintas relativamente à temperatura: ambiente, refrigerado e congelado,

os produtos não podem ser misturados, têm que ser armazenados de acordo com a sua temperatura de conservação.

A programação de atividades que competem por recursos limitados durante um tempo finito é um problema generalizado, que as empresas, grandes ou pequenas têm de resolver. Metodologias de solução têm sido amplamente estudadas nos vários campos da engenharia, ciências da computação, ciências de gestão e negócios, fazendo com que a literatura sobre a programação seja extensa, diversa e difusa [6, 7]. Estas metodologias podem ser classificadas como exatas ou aproximadas, dependendo se buscam a solução ótima ou uma solução aproximada de um problema, respetivamente.

Exceto para uma minoria de problemas para os quais existem algoritmos de complexidade polinomial, a maioria dos problemas de programação são *NP*-difíceis, o que significa que os requisitos computacionais para a obtenção de uma solução ideal, cresce exponencialmente à medida que o tamanho do problema aumenta. O que significa que os métodos exatos só podem ser aplicados com sucesso a problemas de pequena dimensão [8]. Para os problemas com maior dimensão, a solução para a abordagem descrita na literatura, faz uso de heurísticas, meta-heurísticas (pesquisa tabu (PT), *simulated annealing* (SA), algoritmos genéticos (AG), entre outros), inteligência artificial (ou seja programação por restrições e redes neurais) ou solução aproximada, como a relaxação Lagrangeana [9].

2.1 Abordagens para a resolução de problemas de armazenagem

Nos pontos seguintes serão abordados vários métodos para resolver problemas de armazenagem. Serão apresentados vários métodos de solução exata e de metaheurísticas que são métodos de solução aproximada.

O caso de estudo pode ser resolvido através do MIP, como não é um problema de grande dimensão pode ser resolvido por métodos exatos. Quando os problemas permitem a utilização de métodos exatos deve-se optar por estes, visto ser possível obter melhores resultados.

2.1.1 Mixed integer programming

Aplicações:

A programação linear inteira mista (MIP) tem sido aplicada em muitos tipos de problemas, tais como: as localizações dos armazéns, das diversas programações, de transporte, de caixeiro-viajante, de atribuição e outros.

Balinski [10] foi um dos primeiros a formular um problema de localização discreta como um MIP.

Kovacs [11] desenvolveu um modelo MIP, para uma fábrica de componentes eletrónicos, para encontrar a melhor política de armazenamento, por forma a minimizar o tempo de transporte dos materiais no interior do armazém.

Bednar e Strohmeir [12] determinaram a localização de armazéns com recurso a MIP, para tal, atribuíram zonas de consumo para os diferentes armazéns com base no custo do transporte. Bishwal et al [13], recorreram ao MIP para determinar a localização ótima de um produto químico numa fábrica na Índia. Dee et al [14], utilizaram um MIP para solucionar o problema de encontrar pessoas dentro de determinadas instalações tais como hospitais, esquadras da polícia, bombeiros e empresas. Devine [15] minimizou a alocação de custos das jazidas de petróleo para poços de petróleo. Noonan e Giglio [16] usaram MIP para determinar a potência elétrica ideal gerada com base na dimensão de uma fábrica. Austin e Hogan [17] determinaram com a ajuda do MIP a quantidade mínima aceitável para abastecer os tanques de combustível de aviação.

Modelos:

Barbaro et al [18] descrevem os modelos de programação como pertencentes a um subconjunto da classe geral chamada modelos matemáticos de programação. Nos modelos MIP as relações entre as variáveis são lineares. Consegue-se obter a melhor solução para o problema, quando se maximiza ou minimiza uma função objetivo. Um modelo MIP é uma representação matemática de um sistema onde todas as restrições

são lineares e as variáveis podem ser contínuas ou com valores inteiros. A formulação matemática de um modelo MIP com N variáveis e M restrições é:

Otimizar:

$$Z = \sum C_j X_j$$

Sujeito a:

$$\sum_j A_{ij} X_j (\leq) B_i, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

$$X_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

$$X_j = 0 \text{ ou } 1 \quad \text{para alguns } j$$

Em que C_j , B_i e A_{ij} são constantes e X_j é a variável.

Para os problemas MIP têm sido propostos vários métodos. O método que é considerado como o mais eficiente para problemas de pequenas dimensões é, segundo Barbaro *et al* [18], o método *branch and bound*, consequentemente é o mais utilizado na programação computacional.

No entanto, tal como já foi referido, esta abordagem não é indicada para problemas de grandes dimensões com muitas variáveis inteiras pois não são resolúveis em tempo computacional considerado razoável.

Quando os problemas são de grandes dimensões são usualmente utilizadas heurísticas ou metaheurísticas que sacrificando a solução não obtém o ótimo global, conseguem soluções razoáveis num baixo tempo computacional.

2.1.2 Algoritmos genéticos

Aplicações:

Chih-Min *et al* [19] desenvolvem um estudo com Algoritmos genéticos (AG) para lidar com problemas de grupos de encomendas (*order batching*), foi considerado que os lotes podem ter qualquer tipo de estrutura e o armazém qualquer tipo de *layout*.

O AG proposto minimiza diretamente a distância total, parece obter soluções de qualidade em termos de distância de percurso e utilização facilidade.

Dahal *et al* [20] utilizam AG para programar a armazenagem em tanques. A solução do problema envolve a determinação através de um cronograma de descarga dos navios. Os tanques são alocados para serem enchidos com a água dos lastros dos navios, e para escoar a água oleosa. O objetivo é minimizar os atrasos causados aos navios, e maximizar a qualidade da água.

Descrição:

Nas últimas décadas, os AG têm sido intensamente estudados por vários investigadores [21-23]. Foram muitas as aplicações que beneficiaram com os AG, esta técnica é adequada em problemas de otimização complexos (elevado número de variáveis) [23].

O AG é uma meta-heurística que é usada em aplicações computacionais, com o objetivo de encontrar soluções satisfatórias em problemas de otimização, através da técnica de programação que procura imitar a evolução biológica através do processo de seleção natural. Os AG operam com um conjunto populacional em que cada indivíduo tem associado um valor de desempenho relativamente a uma dada função objetivo, os AG seguem o princípio de *Darwin*, os indivíduos mais promissores são utilizados para criar uma nova população, a reprodução ocorre com as combinações dos genes dos vários indivíduos, existindo a hipótese do cromossoma resultante sofrer uma mutação [21, 24].

Os AG são considerados algoritmos de melhoria. Este método pode ser utilizado em todos os problemas que se comportam analogamente com a genética e evolução de populações [25].

Os AG tentam otimizar a adequação de uma população de elementos através da sua recombinação e mutação dos genes. Para aplicar o conceito da genética evolutiva a um problema de otimização no mundo real, duas questões devem ser abordadas: a codificação das possíveis soluções, e a definição da função objetivo que queremos otimizar.

O algoritmo inicia com um conjunto de soluções admissíveis denominado por população. Cada membro da população é representado na forma de cromossoma. Uma solução (um cromossoma) é codificada como uma *string* composta de vários componentes denominados por genes. A população inicial de cromossomas é gerada de acordo com alguns princípios ou em alguns dos casos pode-se fazer uma seleção aleatória.

O algoritmo faz uma avaliação para medir a qualidade das possíveis soluções. A otimização que recorre aos AG é alcançada através de pares de cromossomas com probabilidades proporcionais da sua função objetivo, e combinando-os para criar a descendência.

Além de combinar também são induzidas pequenas mutações na descendência. A substituição das soluções não ótimas por novas soluções é baseada em algumas estratégias. Os cromossomos evoluem através de sucessivas iterações, chamadas de gerações. A avaliação, as otimizações e a substituição das soluções são repetidas até que os objetivos sejam satisfeitos [26].

A estrutura geral dos (AG) pode ser descrita da seguinte forma [27]:

1ºPasso – definir uma representação genética de uma possível solução do problema.

2ºPasso – criar uma população inicial.

3ºPasso – testar as hipóteses que cada indivíduo tem de se reproduzir.

4ºPasso – criar uma nova população, através cruzamento dos cromossomas dos indivíduos tendo em conta a probabilidade de reprodução.

5ºPasso – a cada indivíduo gerado será aplicada uma probabilidade de mutação do seu cromossoma.

6ºPasso – forma-se uma nova população.

7ºPasso – termina devolvendo a melhor solução encontrada.

2.1.3 Simulated annealing e pesquisa tabu

Aplicações:

Chan *et al* [28] desenvolveram um algoritmo híbrido que combina SA com PT, para fazer a gestão e programação de um armazém. O objetivo principal desse trabalho é de minimizar o tempo de transferência do produto desde a receção até a entrega do mesmo. Este algoritmo teve como objetivo de encontrar melhores soluções para problemas de maior complexidade.

Kathryn *et al* [29] desenvolveram um algoritmo de SA, que permite maximizar o embarque tendo em conta o volume de cada veículo de transporte. Os diferentes produtos produzidos por uma determinada empresa têm quatro características físicas comprimento, largura, altura e peso, denotado. Cada produto tem também uma previsão de volume de vendas anual. O objetivo é de minimizar o número de embarques.

Der-Horng *et al* [30] estudaram o problema de programação de um sistema constituído por duas gruas de transporte de contentores (*trainstainers*). O objetivo é minimizar a carga total e tempo utilizado para empilhar os contentores em pilha. O algoritmo SA é desenvolvido para resolver o problema proposto, tendo em conta todas as operações de armazenagem e distribuição dos contentores no porto.

A armazenagem, o *stock* e a distribuição de embalagens retangulares em duas, ou três dimensões é um problema de dimensões consideráveis. O problema da embalagem é definido por maximizar o número (caixas) que pode ser equipado ortogonalmente (isto é, fazer embarque do lote das caixas, com estas paralelas às arestas dos contentores). O objetivo é escolher o maior número de caixas de forma a minimizar o

espaço não utilizado. Jin-Ling *et al* [31] desenvolveram um algoritmo de (SA) associado ao algoritmo (AG) para maximizar os embarques das caixas nos contentores.

Simulated annealing:

Kirkpatrick *et al* [32], apresenta o SA como um algoritmo que devolve uma solução aproximada para problemas NP-completos, que é assintoticamente exato. Na prática, este método produz uma solução polinomial, que em geral é sub-ótima para este tipo de problema.

O algoritmo SA é utilizado em problemas com vários objetivos. Os requisitos básicos para aplicar o SA é de ter um dado conjunto valores e múltiplas variáveis que define uma única configuração do sistema e que a função objetivo pode ser calculada como uma função da configuração do sistema.

O SA pode ser expresso pelos seguintes passos simples sequenciais:

- a) Alterar a configuração inicial de uma forma aleatória;
- b) Aceitar ou rejeitar a mudança feita na alínea a) com base em critérios de aceitação determinados;
- c) Ir para (a), periodicamente reduzindo a temperatura ou analógico de temperatura.

A configuração final e o valor correspondente da função objetivo são obtidos quando a condição da solução especificada está satisfeita [33].

Pesquisa tabu:

A disseminação global da técnica de PT, decorre dos trabalhos realizados por Glover [34, 35]. Essencialmente a PT consiste numa técnica de melhoria de solução, que considera estruturas que permitem explorar com eficiência o histórico de todo o processo de pesquisa. A PT tem como característica básica o facto de ser um método genérico que pode usar um tipo de heurística a cada passo e tendo como objetivo, escapar das armadilhas dos ótimos locais ainda distantes de um ótimo global (faz tabu).

O algoritmo evita movimentos na vizinhança que parecem conter soluções que duplicariam acontecimentos anteriores. Porém um “esquecimento estratégico” é atribuído a esse algoritmo através de uma memória de curto prazo capaz de armazenar os últimos t movimentos tabu. No entanto o status de um movimento tabu não é absoluto. Os critérios de aspiração permitem que um movimento tabu possa ser selecionado se atingir um determinado nível de qualidade.

As funções de memória de médio e longo prazo, também podem ser aplicadas para fornecer uma ampla exploração do espaço de busca. Estratégias intermediárias com memória de médio prazo são baseadas em modificar as regras de escolha de soluções historicamente boas em regiões atrativas e intensificar a busca nessas regiões. A memória de longo prazo diversifica a busca em áreas não exploradas [36-38].

Método a implementar:

Tendo em conta o caso de estudo deste trabalho, dos vários métodos estudados optou-se por escolher um que devolvesse uma solução exata, já que o modelo matemático de programação linear inteira mista (MIP) desenvolvido, apresenta uma dimensão que lhe permite obter soluções ótimas em tempo computacional considerado razoável.

3 Descrição do Problema

Nos silos (portuários) é necessário fazer a armazenagem dos cereais que chegam diariamente por via marítima (através dos navios que atracam no porto, tal como na Figura 2, por via ferroviária ou por via rodoviária.



Figura 2: Navio atracado no porto a descarregar cereais

O transporte dos cereais desde o desembarque até aos silos, tal como na Figura 3, é efetuado através de camiões, que só operam no interior do porto.



Figura 3: Circulação de camiões junto aos silos

Mesmo que os cereais cheguem por via marítima, situação mais usual quando estamos perante um silo portuário, são descarregados para camiões que fazem a ligação entre o navio e os silos de armazenagem.

Se estivermos perante um silo rural os fornecedores só têm duas alternativas: enviar o produto através de camião ou através de comboios.

O transporte utilizado tem que ser adaptado de acordo com a localização geográfica e as infraestruturas dos silos de armazenagem.

Quando os camiões chegam junto aos silos os cereais são descarregados para os tegões de receção tal como observado na (Figura 4) e (Figura 5).



Figura 4: Tegão de recepção ferroviário



Figura 5: Tegão de recepção rodoviário

De seguida, os cereais vão para os elevadores de alcatruzes exemplificados na Figura 6.



Figura 6: Elevador de alcatruzes

Os elevadores de alcatruzes, por sua vez colocam os cereais nos transportadores de corrente, denominados de *redlers* de distribuição (Figura 7), que circulam junto às várias células existentes no interior dos silos.

Por último, o produto é depositado numa célula vazia ou que contenha já alguma quantidade do produto que está a circular, até atingir a capacidade máxima. Quando o *Redler* de distribuição chega à célula que está programada, para armazenar o cereal que está a circular, faz uma paragem e em simultâneo abre-se uma escotilha e o produto é vertido para dentro da célula através de uma raseira.



Figura 7: Redler de distribuição R1

Todos os dias surge a necessidade de armazenar vários tipos/qualidades de cereais e, na prática, aquilo que acontece é que na maioria das vezes as células não estão a ser utilizadas na sua capacidade máxima (a Figura 8 mostra uma célula nesta situação em que até foi possível ir ao interior da mesma para fazer várias medições), verificando-se assim a existência de várias células ocupadas parcialmente com o mesmo tipo de produto, podendo conduzir a situações em que não há células disponíveis para receber os produtos que chegaram.



Figura 8: Interior de uma célula

Algumas células têm como objetivo apenas expedir para clientes. O produto que vai ser armazenado nestas, é aquele que vai sair quase no imediato. As células de expedição recebem produtos das outras células, ou recebem o produto que está a ser descarregado e vai ser logo expedido para o cliente.

Na sala de controlo visualizado na Figura 9 e Figura 10, os controladores enfrentam diariamente o problema de programar as atividades de receção, transferência entre células e de expedição, de forma a otimizar o espaço livre disponível para a receção de novos lotes, isto é, maximizar o número de células vazias, respeitando as restrições de capacidade das células e das linhas de transporte, e satisfazendo as necessidades de receção e expedição.



Figura 9: Sala de controlo do processo

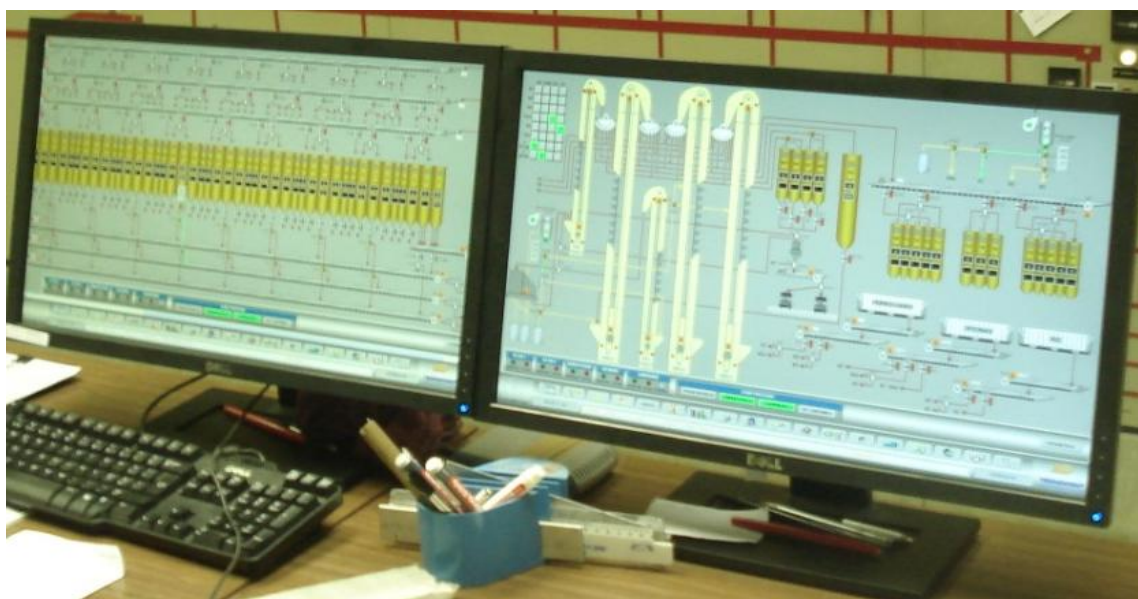


Figura 10: Controlo efetuado através de software

A expedição do produto é efetuada diretamente das células de expedição, os camiões entram nos túneis e posicionam-se debaixo da abertura da célula (Figura 11).



Figura 11: Túneis de entrada dos camiões

3.1 Descrição do Processo

O Silos real do caso de estudo (Figura 12), é composto por um Silo de Armazenagem, um Silo de Expedição, uma Torre de Elevação e um Armazém Horizontal, com capacidade de carregamento autónoma, com duas linhas de transportadores de corrente, elevadores de alcatruzes e transportadores de banda de distribuição, próprios, com capacidade de 350 t/h cada.



Figura 12: Visão geral dos silos

O seu dimensionamento e dos transportadores têm como referencial o cereal padrão, utilizado internacionalmente no ramo que é o trigo $0,75 \text{ kg/m}^3$.

A armazenagem de cereais é feita em células verticais (Figura 13), devidamente individualizadas e equipadas com controlo de temperatura do produto ao longo de toda a sua altura.

Os restantes produtos, são armazenados preferencialmente no Armazém Horizontal.



Figura 13: Vista pelo exterior das células verticais

O Silo tem as seguintes características:

- a) Capacidade de armazenagem de cerca de 100 000 t de graneis alimentares, sendo a grande maioria de armazenagem vertical havendo também um armazém horizontal de cerca de 12 000 t de capacidade.
- b) Três linhas de importação (receção) com a capacidade nominal de 350 t/h, mecanizadas com controlo centralizado numa Sala de Comando e possibilidade de distribuição para qualquer ponto do Silo. As linhas de importação são constituídas pela utilização dos equipamentos abaixo indicados, de um modo flexível, segundo as necessidades de momento:
 - Três tegões de descarga rodoviária (tendo um deles a possibilidade de fazer receção ferroviária em alternativa) com capacidade de 350 t/h. Cada tegão é servido por uma cadeia de transportadores de corrente, da mesma capacidade, que levam o produto até aos elevadores de alcatruzes, podendo debitar para qualquer um deles, segundo a escolha da Sala de Comando;
 - Três elevadores de alcatruzes de 350 t/h, no Silo de Armazenagem, havendo ainda um quarto elevador bipartido, de 100 t/h, que é utilizado para pesagem de produto em balança de circuito, para passagem de produto na tarara de limpeza e para recirculação interna de produtos (na prática trata-se de dois elevadores, um da cave até ao 6º piso e outro do 3º até ao 14º pisos, na Figura 14 podemos observar a cabeça dos elevadores no 14º piso, estando os equipamentos indicados nos 4º e 5º pisos);



Figura 14: Cabeça dos elevadores no 14º Piso

- Três cadeias de *redlers* de distribuição, dispostos ao longo da galeria superior do Silo de armazenagem, (que fazem a distribuição para as diferentes células deste), como pode ser observado na Figura 15;



Figura 15: Galeria superior do silo de armazenagem

- Um transportador de corrente *redler* que transporta o produto entre os elevadores de alcatruzes e o Silo de Expedição, fazendo a distribuição pelas diversas células deste silo. A parte superior do distribuidor, pode ser observado, na Figura 16;
- Para dar flexibilidade ao sistema, todos os elevadores de alcatruzes debitam para um distribuidor de pêndulos (havendo um pêndulo por cada elevador), o qual faz a distribuição pelos circuitos escolhidos pela Sala de Comando.



Figura 16: Parte superior do distribuidor

A expedição de produto, é feita do seguinte modo:

a) Do Silo de Armazenagem:

- Pode ser feita a partir da balança de circuito da Torre de Elevação, a partir das células da torre diretamente, ou utilizando um *redler* de recirculação de 100 t/h, e elevador de alcatruzes de 100 t/h, com a boca de saída situada sobre o tégão rodoferroviário. Esta balança faz igualmente o carregamento de vagões ferroviários.
- Pode ser feita pelos 13 *redlers* de carregamento rodoviário. Estes *redlers* estão equipados com tapetes que fazem uma pré pesagem, destinados a garantir que o camião é carregado com o peso desejado (normalmente o máximo permitido legalmente) o qual será confirmado pela pesagem nas básculas, onde é emitido o certificado de pesagem.

b) Do Silo de Expedição:

- A partir de qualquer uma das três linhas de carregamento, equipadas com balanças de circuito.
- Por meio de um *redler*, a balança da 3ª linha de carregamento pode fazer o carregamento de vagões ferroviários em qualquer um dos ramais privativos do Silo.

c) Do Armazém Horizontal:

- Dada a especificidade quer da instalação quer dos produtos armazenados, o carregamento de camiões é feito por meio das pás carregadoras com que o Silo está equipado sendo a pesagem e emissão de certificado de pesagem feita nas básculas.

Produtos diferentes não se podem misturar, pelo que cada célula só pode estar vazia ou conter um único produto.

A capacidade de armazenagem em peso de cada célula, para um cereal diferente do cereal padrão, como se trata de um volume fixo, depende do peso específico do cereal a armazenar. O peso de produto movimentado, é a tonelada uma vez que é a unidade transaccional do mercado.

3.2 Formulação do Problema

Este problema vai ser formulado como um modelo de programação linear inteira mista, por forma a maximizar o número de células vazias no final do dia. É necessário definir quais são as variáveis de decisão que temos neste problema específico, bem como as suas restrições.

F.O.MAX.:

$$Z = \sum_{j=1}^n -Y_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

S. A:

$$El_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m X_{jik} + \sum_{k=1}^n X_{Tik} - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ijk} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$El_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m X_{jik} + \sum_{k=1}^n X_{Tik} - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ijk} \leq C_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ijk} \leq CL_k, k = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n X_{Tjk} = R_i, i = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ijk} = EP_j, j = 37, 38, 39, 40, 41 \quad (6)$$

$$El_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m X_{jik} + \sum_{k=1}^m X_{Tik} - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ijk} \leq MY_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Para garantir a integralidade binária temos que: $Y_j \in \{0,1\}$

Parâmetros:

EI_i = existência inicial

X_{ijk} = quantidade a enviar da célula i para a célula j através da linha k

T = tegões

i = célula de origem

j = célula de destino

n = número de células

m = número de linhas transportadoras

C_i = capacidade máxima de cada célula

CL_k = capacidade máxima da linha transportadora

R_i = quantidade rececionada em cada tegão

X_{Tjk} = quantidade a enviar do tegão T para a célula j através da linha k

EP_j = produto a ser expedido

M = número muito grande

A função objetivo (1) tem por objetivo maximizar o número total de células vazias.

Restrições:

A função objetivo vai estar sujeita as seguintes restrições:

De acordo com a informação dada pela empresa a restrição de conservação de massa (2), garante que a existência inicial (EI_i), (dado do problema) mais o somatório das entradas menos o somatório das saídas, tem que ser maior ou igual a zero, em que n corresponde ao número total de células e o m corresponde ao número total de linhas transportadoras, ou seja, que a quantidade de produto que sai não é superior a quantidade que está armazenada mais a que é rececionada.

A restrição de capacidade das células (3), garante que a quantidade de produto enviado para as células não excede a capacidade máxima das mesmas, é assegurado que a existência final da célula i tem que ser menor ou igual à capacidade máxima da célula i (C_i).

A restrição de capacidade das linhas transportadoras (4), esta restrição garante que a quantidade de produto a enviar não excede a capacidade de cada uma das linhas, garante que os fluxos de transferência de produto entre células através de uma linha transportadora k , tem que ser menor ou igual à capacidade máxima dessa linha (CL_k).

Tipo de produto, esta restrição garante que não há mistura de produto nas células. Vai ser tratada de uma forma implícita, isto é, eliminando as variáveis de decisão associadas a emparelhamentos não válidos – fluxos entre células com diferentes tipos de produtos

Em (5) as restrições de receção, garantem que os planos de receção – transporte e armazenagem de produtos rececionados, e expedição - transferência para as células de expedição dos produtos que vão sair para os clientes no dia seguinte, devem ser incluídos na solução obtida.

Para os l tegões (T_i , $i= 1,2,\dots, l$), a quantidade rececionada em cada tegão, R_i , vai ser transferida para qualquer uma das células do silo, até ao limite da capacidade máxima das células e das linhas transportadoras.

Quanto à expedição as restrições (6) garantem que as células de expedição (37,38,39, 40 e 41) devem cumprir o programa de expedição para os dias seguintes (EP_j). Nesta situação como o produto está sempre a entrar e a sair, não é necessário ter em conta as restrições de mistura de produto (no entanto, temos que garantir que a quantidade de produto armazenado não excede a capacidade das células de expedição, o que já está considerado nas restrições de capacidade).

Nas restrições de célula vazia (7), considera-se que a existência inicial mais as entradas menos as saídas mais as entradas de produto pelos tegões tem que ser menor ou igual a um número muito grande multiplicado pela variável binária.

Variáveis de decisão:

As variáveis de decisão vão ser definidas por X_{ijk} (quantidade de produto a enviar da célula i para célula j , através da linha k), em que o i é referente à célula de origem, o j é referente à célula de destino e o k é referente às linhas de transporte.

Também vai ser criada um variável binária Y_j adicional, para representar no modelo as células vazias, tal que:

$$Y_j = \begin{cases} 0 & - \text{célula } j \text{ está vazia} \\ 1 & - \text{caso contrário} \end{cases}$$

Abordagem proposta:

De seguida procede-se a descrição das características e o dimensionamento do silo de armazenagem de cereais utilizado como referência para o caso de estudo, bem como a implementação da solução proposta.

Para facilitar o trabalho dos programadores foi desenvolvido um MIP na plataforma Excel/VBA.

Características do silo do caso de estudo:

O silo utilizado para o caso de estudo é um silo de armazenagem de cereais, rural, de dimensão média, é constituído por quarenta e uma células, cada uma com capacidade de 750 t de cereal padrão. Como já foi referido anteriormente o dimensionamento das células e dos transportadores têm como referencial o cereal padrão, utilizado internacionalmente no ramo que é o trigo 0,75 kg/m³.

As células, C37, C38, C39, C40, C41 são células de expedição. Estas células não podem fazer a recirculação do produto pelas outras células, o que significa que todo o

produto aí armazenado só pode sair diretamente para os camiões, tal como é demonstrado no esquema da Figura 17.

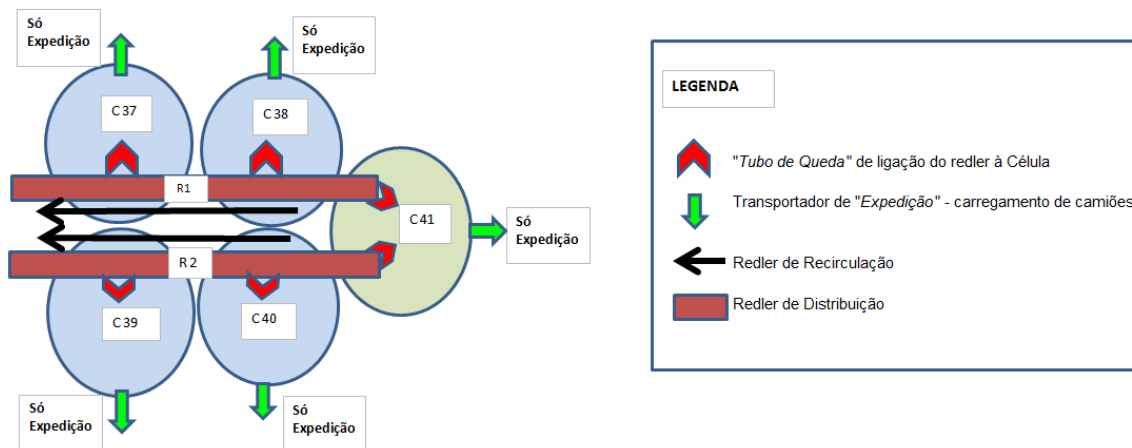


Figura 17: Esquema das células de expedição

O silo possui duas linhas de transporte, com capacidade de 100 t/h, que podem ser utilizadas para a receção de produto ou para a recirculação do mesmo. As linhas são constituídas por dois elevadores de alcatruzes com a capacidade de 100 t/h, dois tegões de receção, T1 e T2, com a capacidade de 100 t/h, dois transportadores de corrente “Redlers de distribuição” na parte superior com a capacidade de 100 t/h e dois transportadores de corrente “Redlers de recirculação na parte inferior com a capacidade de 60 t/h.

Os Redlers R1 e R2, recebem dos elevadores E1 e E2 e podem debitar para qualquer uma das quarenta e uma células. Os Redlers R3 e R4 podem receber de qualquer uma das células exceto das células de expedição C37, C38, C39, C40e C41 e debitam para os elevadores E1 e E2. O elevador E1 recebe do tegão T1 ou dos Redlers R3 e R4, o elevador E2 recebe do tegão T2 ou dos Redlers R3 e R4.

As células de expedição C37, C38, C39, C40e C41 estão equipadas cada uma com um transportador de parafuso sem-fim de capacidade de aproximadamente 110 t/h, cada camião carrega em média 25 t.

O silo trabalha em média 8 horas na expedição para o exterior e 16 horas na receção.

Cada célula tem a capacidade total máxima de 750 t de cereal padrão.

A capacidade total máxima de armazenagem é de $36 \times 750 = 25.500$ t de cereal padrão.

A capacidade máxima de receção é de $2 \times 100 \times 8 = 1.600$ t/dia de cereal padrão.

A capacidade máxima de expedição é de $5 \times 110 \times 8 = 4.400$ t/dia de cereal padrão.

Este silo pode armazenar até quarenta e um produtos diferentes, que é igual ao número de células do silo incluindo as de expedição.

3.3 Implementação da solução

A implementação do MIP, foi realizada através de uma aplicação desenvolvida no Excel com recurso ao VBA para a construção do modelo e a automatização de tarefas.

Tentou-se desenvolver uma aplicação flexível, por forma a que o utilizador possa alterar todos os dados, que considere necessários, por exemplo, acrescentar mais células ou mais produtos. O programa permite ser corrido ao longo do dia para ajustar alguma receção ou expedição de material que não estava prevista, bem como voltar a fazer a programação de forma a maximizar o número de células vazias, pois sempre que o produto é expedido temos mais células desocupadas.

Seque-se uma breve descrição das várias etapas do processo:

O programador tem que preencher diariamente a folha de dados (do ficheiro Excel), ao final da tarde, para permitir correr o programa antes das 8 horas do dia seguinte, porque é quando se inicia os postos de trabalho, e a essa hora já tem que estar tudo definido, ou seja, como se vai proceder à distribuição dos produtos pelas várias células. A folha de dados que vai ser o painel de bordo do programador é constituída pela existência de produtos nas células no instante inicial, pelo plano de receções previstas e pelas necessidades de transferência para as células de expedição tal como se pode observar na Figura 18.

As existências nas células só devem ser preenchidas no final de cada dia, por forma a obtermos a existência inicial no início de cada dia. Quando se introduzem as quantidades dos vários produtos pelas várias células ficamos também a saber qual o total de cada produto armazenado nos silos.

O programador tem que efetuar uma análise dos mapas que recebe com os dados, referentes às previsões de receção dos produtos para o dia seguinte, para proceder ao seu preenchimento da coluna relativa ao plano de receção diária (Figura 20).

		Plano para o dia
		Receção
Produtos	P1	350
	P2	250
	P3	0
	P4	0
	P6	0
	P7	400
	P22	0
	P23	500
	P28	0
	P32	0
	P33	300
	P41	0

Figura 20: Coluna das receções previstas

Relativamente à expedição, o programador tem que analisar as previsões para os próximos dias, por forma a garantir que as células de expedição contenham a quantidade de produto suficiente para expedir. Cabe ao programador preencher as colunas referentes às necessidades de transferência para as células de expedição (Figura 21).

		Necessidades de transferência para as células de expedição				
		C37	C38	C39	C40	C41
Produtos	P1	0	0	450	0	0
	P2	0	0	0	0	500
	P7	0	0	0	0	0
	P8	0	80	0	0	0
	P9	0	0	0	0	0
	P25	800	0	0	0	0
	P26	0	0	0	0	0
	P39	0	0	0	0	0
	P40	0	0	0	500	0
	P41	0	0	0	0	0

Figura 21: Necessidades nas células de expedição

A folha de dados está formatada de forma a visualizar o volume total de produto armazenado, a taxa de ocupação das células, o número e a percentagem de células vazias e a capacidade total de armazenagem (Figura 22).

Painel de Bordo									
Volume total armazenado =		10.550,0	ton	Capacidade Total=		10.550,00	ton		
Taxa ocupação =		34%							
Nº Células Vazias =		12							
% Células Vazias =		29%							

Figura 22: Valores referentes a armazenagem

Assim que o programador finalizar o preenchimento da folha de dados, pode passar ao preenchimento da folha do MIP, tal como se observa na Figura 23.

Número de variáveis de decisão:				i=origem	1	1	1	1	1	1	34	34	34	34	34	34	34	T	T	T	T	1	2	4	5	30	31	32	34					
190			PREENCHER	j=destino	13	13	19	19	25	25	13	19	19	25	25	39	39	1	1	41	41													
				k=linha	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2													
RHS	SINAL	TOTAL	Restrições		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y					
500	≤	0	Conservação o de massa	Célula 1	1	1	1	1	1	1											-1	-1												
0	≤	0		Célula 3																														
250	≤	0		Célula 32																														
0	≤	0		Célula 33																														
400	≤	0		Célula 34								1	1	1	1	1	1	1																
0	≤	0		Célula 35																														
0	≤	0		Célula 36																														
250	≤	0	Capacidade das células	Célula 1	-1	-1	-1	-1	-1	-1									1	1														
600	≤	0		Célula 31																														
500	≤	0		Célula 32																														
750	≤	0		Célula 33																														
350	≤	0		Célula 34								-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1																
750	≤	0		Célula 35																														
750	≤	0		Célula 36																														
1600	≤	0	Capacidade das linhas	Linha 1 (K=1)	1		1		1			1		1		1		1		1														
1600	≤	0		Linha 2 (K=2)		1		1		1	1		1		1		1		1		1													
350	=	0	Receção		1														1	1														
250	=	0	por produto		2																1	1												
500	≤	0	BINÁRIAS	Célula 1	1	1	1	1	1	1									-1	-1			##											
0	≤	0		Célula 35																														
0	≤	0		Célula 36																														
800	=	0	Expedição	Célula 37 -E																														
500	=	0		Célula 41 -E																	1	1												
		0	FUNÇÃO OBJETIVO																								-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
		SOLUÇÃO																																

Figura 23: Modelo MIP

Para preencher esta folha de Excel começa por clicar no botão “PREENCHER” tal como se indica na Figura 24

Número de variáveis de decisão:			i=origem
190			PREENCHER
			j=destino
			k=linha
RHS	SINAL	TOTAL	Restrições

Figura 24: Botão para preencher a matriz do modelo

O programa faz a leitura dos dados do problema e vai preencher a matriz do modelo com os coeficientes tecnológicos, o lado direito das restrições (RHS) e os coeficientes da função objetivo.

As variáveis de decisão só são consideradas as que tem emparelhamentos possíveis e não todas as combinações de possíveis relativamente a transferências entre células.

No modelo na coluna referente às restrições de receção por produto só são preenchidas as necessárias, ou seja, só são considerados os produtos que são rececionados.

Não se considera ainda para onde são transferidos os produtos novos que são rececionados. Se chegar algum produto diferente dos que já existem armazenados pode ser facilmente afetado a qualquer uma das células vazias.

4 Resultados e Análise

Para testar o modelo foi utilizado um exemplo real fornecido pela empresa (Figura 25). Das quarenta e uma células existentes, sete delas estão vazias: C3, C7, C14, C28, C33, C35 e C36. As restantes células têm dez produtos armazenados: P1, P2, P3, P7, P8, P19, P23, P25, P33 e P40.

	C1	C2	C4	C5	C6	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C29	C30	C31	C32	C34
P1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0	0	350	0	0	0	0	0	250	0	0	0	0	0	0	400
P2	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0
P3	0	250	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150	0	0
P7	0	0	0	0	0	350	0	0	450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	0	0	0	0	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	0	300	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	0	0	0	0	0	500	0	150	0	0	0	0	0	0	0	250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P23	0	0	0	0	0	0	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0	0	0	0	0
P33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0	400	0	0	0	0	450	0	0	0	0
P40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	250	0	0

Figura 25: Dados dos produtos armazenados pelas várias células

O modelo de teste também contém os dados referentes aos produtos que vão ser expedidos. Vão ser expedidas 400 t do produto P1 pela célula C39., 500 t do produto P2 pela C41, 80 t do produto P8 pela C38, 800 t do produto P25 pela C37 e 500 t do produto P40 pela C40. E que está previsto serem rececionadas 350 t do produto P1, 250 t do produto P2, 400 t do produto P7, 400 t do produto P23 e 300 t do produto P33, tal como representado na Figura 26.

		Necessidades de transferência para as células de expedição				
	Receção	C37	C38	C39	C40	C41
P1	350	0	0	450	0	0
P2	250	0	0	0	0	500
P3	0	0	0	0	0	0
P7	400	0	0	0	0	0
P8	0	0	80	0	0	0
P19	0	0	0	0	0	0
P23	400	0	0	0	0	0
P24	0	0	0	0	0	0
P25	0	800	0	0	0	0
P33	300	0	0	0	0	0
P40	0	0	0	0	500	0

Figura 26: Produtos a rececionar e a expedir

O modelo desenvolvido vai indicar uma solução, através das variáveis de decisão, sobre a quantidade de produto a transferir entre células, qual a célula de origem e a de destino e que linha transportadora a utilizar.

O modelo consegue otimizar o número de células vazias, considerando o que já existe nas células, o que está para ser rececionado e o que está para ser expedido. No exemplo utilizado, inicialmente existiam sete células vazias (Figura 27), depois de correr o modelo este número aumentou para dezassete (Figura 28).

Na Figura 27 as setas representam o fluxo dos materiais decorrentes de correr o modelo proposto.

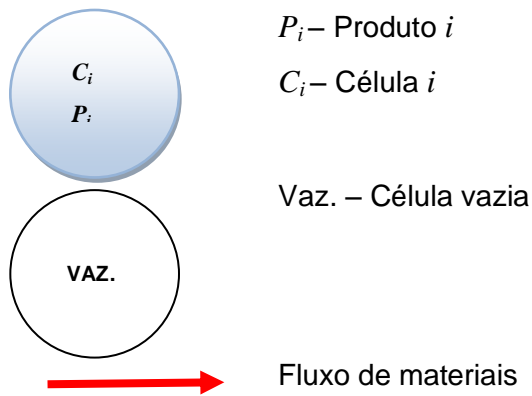
Cada círculo corresponde a uma célula, cada uma delas pode conter um determinado produto que é representado por cores diferentes e as células vazias estão representadas por círculos em branco.

Após correr a aplicação um exemplo da solução proposta observado na Figura 27, o produto (P3) vai ser transferido da célula C2 e C18 para a célula C5. Há uma melhoria significativa do processo, pois só com esta transferência é possível ficar com duas células vazias.

Após efetuadas todas as transferências propostas pela aplicação o resultado final é demonstrado na Figura 28, onde é possível observar as novas células vazias.

Estes resultados foram obtidos em tempos computacionais abaixo dos 60 segundos o que, em conjunto com a qualidade das soluções obtidas, nos permitem concluir da eficiência e adequação do modelo desenvolvido ao problema real.

Legenda:



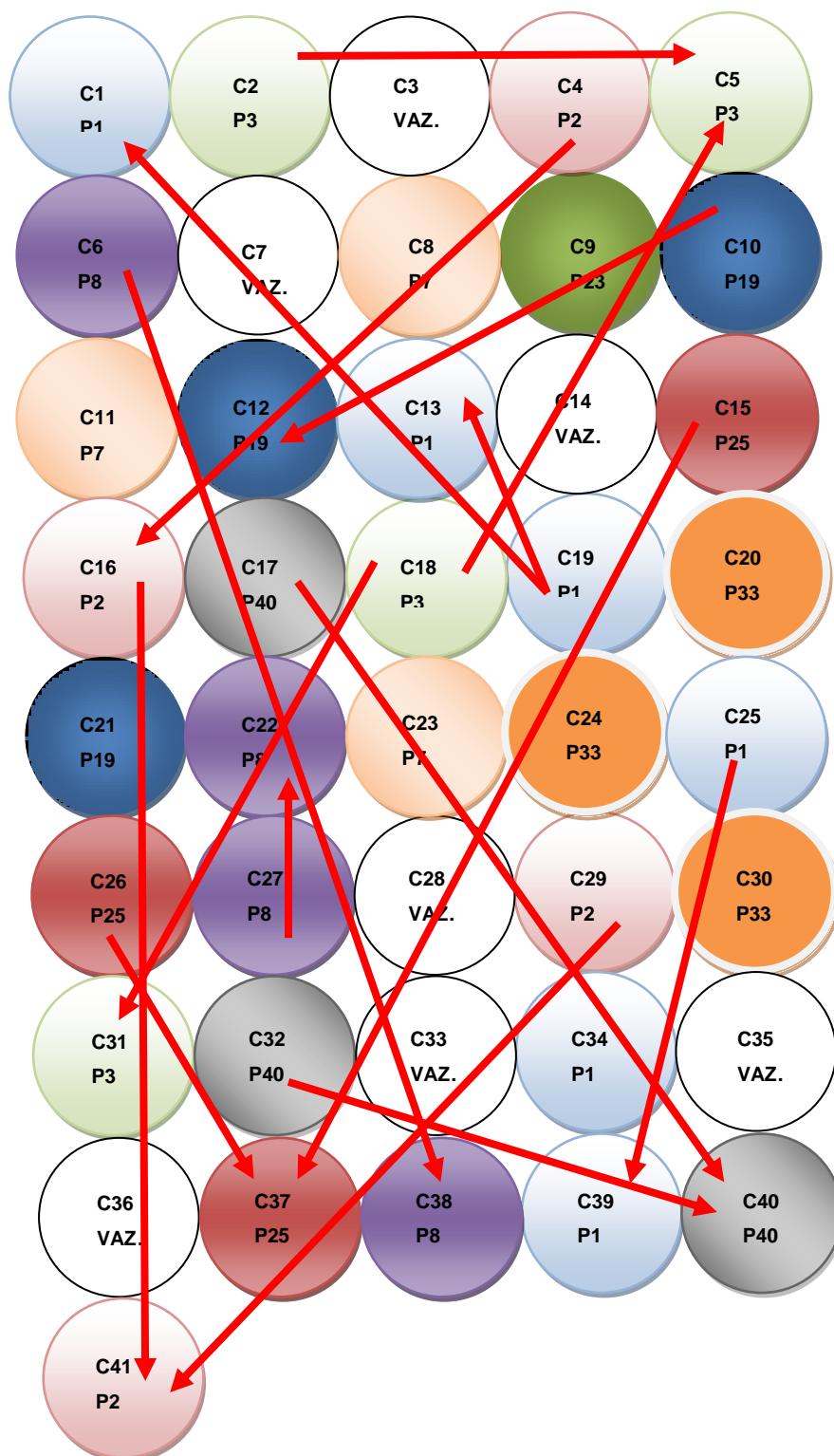


Figura 27: Situação inicial (estado inicial das células)

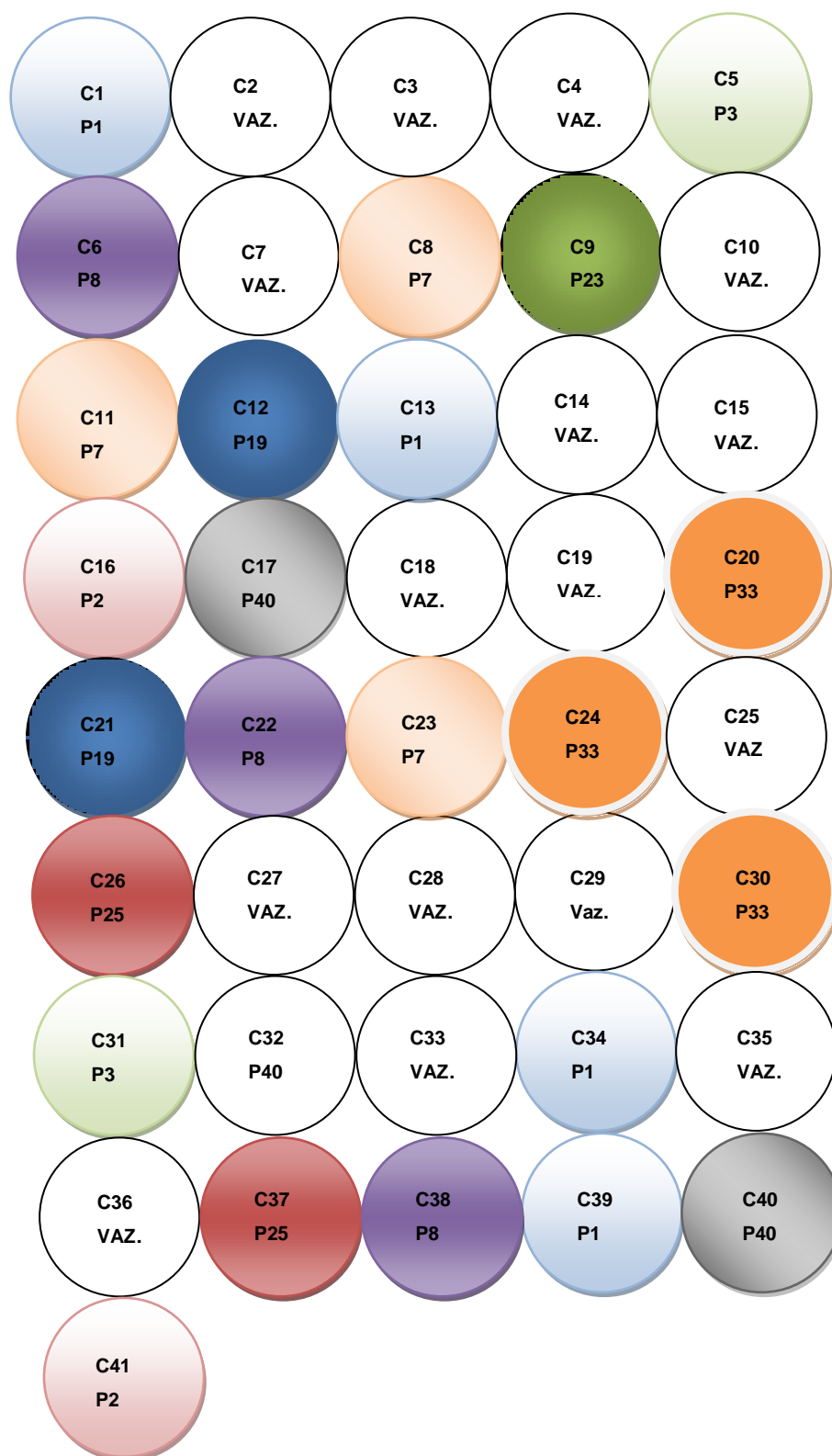


Figura 28: Solução final (estado final das células)

5 Conclusões

O trabalho apresentado teve como objetivo desenvolver um modelo de otimização para a resolução do problema real de gestão do espaço livre de armazenagem num Silo de Cereais.

O problema foi formulado como um modelo de programação linear inteira mista, e implementado na plataforma Excel/VBA. Esta implementação abrange todo o processo relativo à atividade em causa, isto é, vai desde a recolha de dados, ao seu tratamento e análise, até à solução final de distribuição dos vários produtos pelas várias células.

Os resultados obtidos mostram que o modelo otimiza o número de células vazias, tendo em conta os produtos que estão armazenados mais os que estão para ser rececionados e expedidos, em tempo computacional inferior a 60 segundos, constituindo, assim, uma importante mais valia para a empresa em causa.

Como trabalho futuro, pode-se desenvolver o atual sistema para incluir a determinação da quantidade de produto a transferir para as células de expedição, e a utilização das células vazias para receber novos produtos.

Referências Bibliográficas

- [1] G.Jinxiang, et al., "Research on warehouse operation: A comprehensive review," Science Direct, pp. 1-21, 2006.
- [2] M. Lopes, "Apontamentos de Logística," 2010.
- [3] M. Goetschalckx, "Storage Systems and Policies," springer, 2012.
- [4] J. P. v. d. Berg and W. H. M. Zijm, "Models for warehouse management: Classification and examples," Elsevier, pp. 519-528, 1999.
- [5] J.Oliveira, "Scheduling the truckload operations in automatic warehouses," Science Direct, pp. 723-735, 2005.
- [6] D.Brown, et al., "A survey of intelligent scheduling systems," Kluwer Academic Publishers: Boston, US, pp. 1-40, 1995.
- [7] S.Reklaitis, "Overview of Scheduling and Planning of Batch Process Operations," NATO Advanced Study Institute, Batch Processing Systems Engineering, Antalya, Turkey, 1992.
- [8] S.French, "Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop," New York: Ellis Horwood, Ltd., John-Wiley & Sons, 1982.
- [9] A.Jain and S.Meeran, "A state-of-the-art review of job-shop scheduling techniques," Technical report, University of Dundee, Scotland, UK, 1998.
- [10] M. L. Balinski, "On Finding Integer Solutions to Linear Programs," Mathematica vol. 5, 1964.
- [11] A. Kovacs, "Optimizing the storage assignment in a warehouse served by milkrun logistics " Elsevier, pp. 312-318, 2010.
- [12] L. Bednar and E. Strohmeier, "Warehouse location Optimization and Vehicle Scheduling in Consumer Goods Manufacturing," Zeitschrift Fur Operations Research, vol. 23, pp. B89-B104, 1979.
- [13] S. K. Bishwal, et al., "A Transportation Model for Optimal Plant Location," Opsearch, vol. 9, pp. 112-124, 1971.
- [14] N. Dee and J. C. Liebman, "Optimal location of Public Facilities," Naval Research Logistics Quarterly, vol. 19, pp. 753-759, 1972.
- [15] M. D. Devine, "A Model for Minimizing the Cost Drilling Dual Completion Oil Wells," Management Science, vol. 20, pp. 532-535, 1973.
- [16] F. Noonan and R. J. Giglio, "Planning Electric Power Generation: A Nonlinear Mixed Integer Employing Bender's Decomposition," Management Science, vol. 23, pp. 946-956, 1977.
- [17] L. M. Austin and W. W. Hogan, "Optimizing the Procurement of Aviation Fuels," Management Science, vol. 22, pp. 515-527, 1976.
- [18] R. W. Barbaro and R. V. Ramani, "Generalized multiperiod MIP model for production scheduling and processing facilities selection and location," Technical Papers pp. 107-114, 1986.

-
- [19] H. C.-M. Hsu, et al., "Batching orders in warehouses by minimizing travel distance with genetic algorithms," *science direct*, pp. 169-178, 2005.
 - [20] K. P. Dahal, et al., "A Case Study of Scheduling Storage Tanks Using a Hybrid Genetic Algorithm," vol. 5, pp. 283-293, 2001.
 - [21] J. H. Holland, "Genetic Algorithms," *Scientific American*, vol. 267, pp. 66-72, Jul 1992.
 - [22] R. J. Mitchell, et al., "Array pattern synthesis in the complex plane optimised by a genetic algorithm," *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 1843-1845, Sep 26 1996.
 - [23] N. Chaiyaratana and A. M. S. Zalzala, "Recent Developments in Evolutionary and Genetic Algorithms: Theory and applications."
 - [24] G. Ramani.R, et al., "A perspective view on Travelling Salesman Problem using Genetic Algorithm."
 - [25] J. H. Holland, "Adaptation in Nature and Artificial Systems," University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
 - [26] D. E. Goldberg, "Genetic algorithm in search, in: Optimization and Machine Learning," Addison-Wesley, New York, 1989.
 - [27] H. Muhlenbein, "Genetic algorithms," E. Aarts, J.K. Lenstra (Eds.), *Local Search in Combinatorial Optimization*, Wiley, New York, pp. 137-171, 1997.
 - [28] F. T. S. Chan and V. Kumar, "A TSSA Algorithm based Approach to Enhance the Performance of Warehouse System," Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, The University of Hong Kong Pok Fu Lam Road, Hong Kong.
 - [29] A.D.Kathryn, et al., "A simulated annealing based hyperheuristic for determining shipper sizes for storage and transportation," *Science direct*, 2005.
 - [30] L.Der-Horng, et al., "Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm," *science direct*, 2006.
 - [31] L.Jin-Ling, et al., "Hybrid Genetic Algorithm for Container Packing in Three Dimensions," *IEEE*, pp. 353-359, 1993.
 - [32] S. Kirkpatrick, et al., "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, vol. 220, pp. 671-680, 1983.
 - [33] H. DAS, et al., "Scheduling of Serial Multiproduct Batch Processes Via Simulated Annealing," Department of Chemical Engineering, University of Virginia, Charlottesville, 1990.
 - [34] F.Glover., "Tabu Search - Part I," *ORSA Journal on Computing*, 1(3), Summer, pp. 190-206, 1989.
 - [35] F.Glover, "Tabu Search - Part II," *ORSA Journal on Computing*, 2(1), Winter, pp. 4-32, 1990.
 - [36] M.Laguna and F.Glover, "Integrating Target Analysis and Tabu Search for Improved Scheduling Systems," *Expert Systems with Applications*, vol. 6, pp. 287-297, 1993.
-

-
- [37] M.Laguna, et al., " Intelligent Scheduling with Tabu Search: An Application to Jobs with Linear Delay Penalties and Sequence-Dependent Setup Costs and Times," Journal of Applied Intelligence, vol. 3, pp. 159-172, 1993.
- [38] M.Laguna, et al., "Tabu Search Methods for a Single Machine Scheduling Problem," Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 2, 1991.